

马56区块致密油藏“缝控”体积压裂技术

向洪

中国石油股份公司吐哈油田分公司工程技术研究院 新疆鄯善 838202

通讯作者:Email:xianghong1@petrochina.com.cn

引用:向洪.马56区块致密油藏“缝控”体积压裂技术[J].油气井测试,2018,27(4):49-54.

Cite: XIANG Hong. 'Fracture controlled' volume fracturing technology for tight reservoirs in Ma56 block[J]. Well Testing, 2018, 27(4): 49-54.

摘要 马56区块致密油藏采用水平井体积压裂开发技术后,仍有大量的地质储量无法得到有效动用,整体采收率只有3%。为了进一步提高区内储层采收率,配套形成井网加密、长水平段钻井、交错布缝、缩短簇间距、增加分簇数、提高排量、提高细砂比例的井网及裂缝双加密“缝控”体积压裂技术,通过人工裂缝对储层的全覆盖来实现提高储层动用程度以及单井产量的目的。现场应用41井次,有效率100%,平均单井日产量26.2 t,较前期基础井网体积压裂效果提高36.7%~65.8%,增产效果明显,为研究区块致密油藏提高单井产量提供了技术支撑。

关键词 马56区块;致密油藏;“缝控”体积压裂;水平井;井网加密;采收率

中图分类号:TE357 文献标识码:B DOI:10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.04.0008

‘Fracture controlled’ volume fracturing technology for tight reservoirs in Ma56 block

XIANG Hong

Engineering Technology Research Institute, PetroChina Tuha Oilfield Company, Shanshan, Xinjiang 838202, China

Abstract: Although the tight oil reservoir of the Ma56 block already used the development technology of horizontal well volume fracturing, there is still a large amount of geological reserves that cannot be effectively utilized, and the overall recovery rate is only 3%. In order to further improve the reservoir recovery in the block, this paper developed a ‘fracture controlled’ volume fracturing technology of infilled well pattern and fractures based on infilled well pattern, the long horizontal section, staggered fracturing, shortening cluster spacing, increasing clustering number, increasing displacement and increasing the proportion of fine sand. Through the full coverage of the reservoir by artificial fractures, the purpose of improving reservoir utilization and single well production is achieved. The technology has been applied in the field for 41 times. The results show that the efficiency can reach 100%, and the average single-well daily oil production is 26.2 t, which is 36.7%~65.8% higher than the previous volume fracturing of basic well pattern. These effects fully prove that this technology can provide technical support for improving the single well production of tight reservoirs.

Keywords: Ma 56 block; tight reservoir; ‘fracture controlled’ volume fracturing; horizontal well; infilled well pattern; recovery

近年来,致密油气的勘探开发已成为国内外热点领域之一,水平井+体积压裂改造是实现致密油气储集层开发最有效的技术手段^[1-2]。自2013年以来,吐哈油田在三塘湖盆地马56区块致密油通过实施水平井+体积压裂改造,相继在马58H、马57H等井获得高产工业油流,随后进行了大规模推广应用,实现了区块大规模水平井开发建产,也使得该区块成为吐哈油田油气开发的主要接替领域。由于致密油藏开发难度大、对技术要求高、投入资金大,加之近年来低油价背景下,如何最大限度的挖掘致密油单井产能以及最终采收率,实现效益开发

是关键,这也是国内外致密油开发共同面临的难题。实践表明,进行地质工程一体化研究,使地质认识和工程实践最大限度地紧密结合,打通环节间的壁垒,能够更有效挖掘各个开发环节的效益^[3]。在致密油开发领域中,水平井体积压裂的理念目前主要还是靠分段多簇压裂工艺来实现,北美致密油开采技术快速发展,呈现个性化、精细化、一体化实时动态和全周期管理趋势,对每一口井的压裂段、射孔簇进行精细选位和个性化压裂方案优化设计以最大限度地提高单井产量,其中又以高密度完井、长水平段钻井、压裂段数倍增以及缩小井距为

技术发展趋势,如:美国 Bakken 和 EagleFord 等毯式油藏分布区,平台水平井组距从 300 m 减小至 100 m 左右,部分井区将进一步减小至 57 m;最大水平段达到 3 500 m^[4],单井改造段数可达数十段,最大限度的增大油藏接触面积和改造体积;随着北美在致密油勘探和开发方面的不断突破,我国也加快了致密油的研究进展,经过多年的不断发展逐步形成了长水平井优快钻井和水泥浆体系等技术系列,为提高水平井油层钻遇率、安全快速钻进提供有效支撑,在压裂工艺方面形成了以速钻桥塞、裸眼封隔器滑套、水力喷射等为主体的水平井分段体积压裂技术,同时压裂优化设计、压裂液体系研发也取得创新进展,实现了“千方砂、万方液”的大规模体积改造,国内如长庆、新疆等油田水平井长度已经达到 2 000 m 以上,通过水平段长压裂段数以及分簇数量的增加,使得“裂缝控制”储量大幅度增加,单井产量也有明显提高。

马 56 区块致密油开发初期采用 400 m 基础井距,水平段长度一般低于 800 m,通过生产动态及试井分析资料表明:基础井网井间储量未全部动用,单井产量递减快,区块整体采收率低,仅为 3%。为了进一步提高单井产量和采收率,在研究和总结国内外压裂效果的基础上提出了井网及裂缝双加密的“缝控”体积压裂的思路,即通过人工裂缝对储层的全覆盖来实现提高储层动用程度以及单井产量的目的。研究配套形成了井网加密、长水平段、交错布缝、缩短簇间距、增加分簇数、提高细砂比例的“缝控”体积压裂关键技术,现场应用取得了较好的效果,为研究区块致密油藏提高单井产量提供了技术支撑。

1 地质概况

三塘湖盆地位于新疆东北部,属于哈密地区,呈北西-南东向展布,总面积为 $2.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[5]。马朗-条湖凹陷是盆地内致密油气勘探开发的主要领域,其主力油藏为二叠系条湖组,油层埋深在 2 000~3 000 m 之间,油层厚度分布在 10~40 m 之间。储集层岩性以凝灰岩为主,其中,石英、斜长石成分高,含量达 90% 以上,脆性指数为 0.46~0.54,具有较强的脆性特征。储集层具有纳米级孔喉特征,孔喉半径主要集中在 0.05~0.10 μm ,杨氏模量在 $2.52 \times 10^4 \sim 3.08 \times 10^4 \text{ MPa}$ 之间,泊松比分布在 0.21~0.23 之间,天然裂缝发育。孔隙

度分布在 14%~22% 之间,渗透率在 $0.1 \times 10^{-3} \sim 0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,平均含油饱和度为 70.2%,属于典型的致密储层。

2 “缝控”体积压裂关键技术

“缝控”体积压裂主要技术原理是在前期既定井网以及开发模式的情况下,通过井网加密(一次或二次加密)、增加水平段长度、增加分段和分簇数量、错位射孔、大规模体积改造、提高施工排量等方式,使得井筒与井筒之间人工裂缝所能控制或波及到的储量范围最大化,形成“缝控”基质单元,减少储层未动用储量,实现水平井筒和人工裂缝对整个油藏储量的有效控制和动用,从而达到进一步提高单井产量和区块采收率的目的。

2.1 井网加密

马 56 区块前期采用水平井矩形五点法井网,排距 400 m,水平井长度大多在 500~800 m 之间,根据前期区块生产动态及试井分析表明,基础井网井间储量未能全部动用,未动用储量达到 53.1%。通过深化油藏认识,若将排距由原基础井网的 400 m 缩短至 100 m 以后,单井可以新增可动用储量 $14.6 \times 10^4 \text{ t}$,这样将大幅度减少未动用区域,同时由于井距的缩小,还能够进一步提高相邻井在压裂和注水时的压力传导效果,实现井与井之间的有效驱替和能量补充,从而提高区块最终采收率。

2.2 增加水平段长度

“水平井+大规模体积压裂”是致密油勘探开发的核心技术^[6],但是目前对最优水平段长度却没有统一论。就马 56 区块而言,由于前期受到地质认识以及钻井技术的限制,水平段长度大多在 600 m 左右,单井累计产油量一般低于 5 000 t,难以达到经济开发。近年来随着研究区块认识的不断深入,通过地质工程一体化攻关,集成水平井钻井技术,区块钻井品质明显提高。从图 1 可以看出,攻关之后相比 2013 年勘探初期平均水平段长提高 35.6%,油层钻遇率也由 76.5% 提高至 88.6%,钻井周期由最初的 60 d 缩短至 38.3 d,在降低钻井费用的同时,提高水平井长度和钻遇率。统计表明,随着水平段长度和钻遇率的增加,尤其是 1 000 m 以上水平段井的实施,单井累计产油量也提高到 $1.5 \times 10^4 \text{ t}$ 以上,并且使得自喷生产时间提高 1.5 倍,应用效果突出。

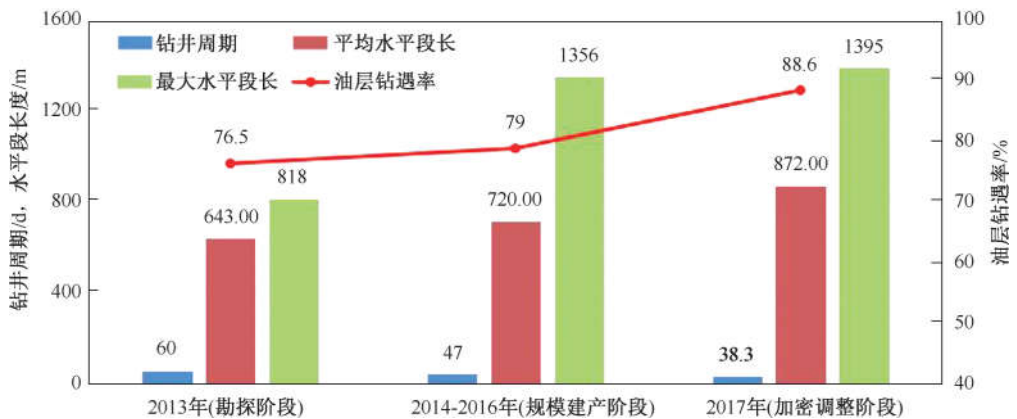


图 1 不同阶段水平井主要钻井指标

Fig.1 Main drilling indicators for horizontal wells at different stages

2.3 交错布缝

压裂布缝时,通常存在邻井交错布缝和正对布缝两种方式,在单条缝的规模,即“缝控单元”相同,且泄油面积不存在重叠时,交错布缝与对称布缝的效果是一样的;当半缝长大于井距的一半,甚至大于等于井距时,交错布缝可以更加有效地采出井间及缝间空白区的储量^[7]。研究区内前期优化裂

缝半缝长为 200 m 左右,通过井网加密后,井距由 400 m 缩短至 200 m 以内,在改造规模和半缝长既定的条件下,通过交错布缝不仅可以更加有效地采出井间及缝间空白区的储量,扩大裂缝控制面积,同时在不降低单段规模的前提下有效的降低了井与井之间裂缝沟通的风险,进一步提高缝间剩余油动用程度(图 2)。

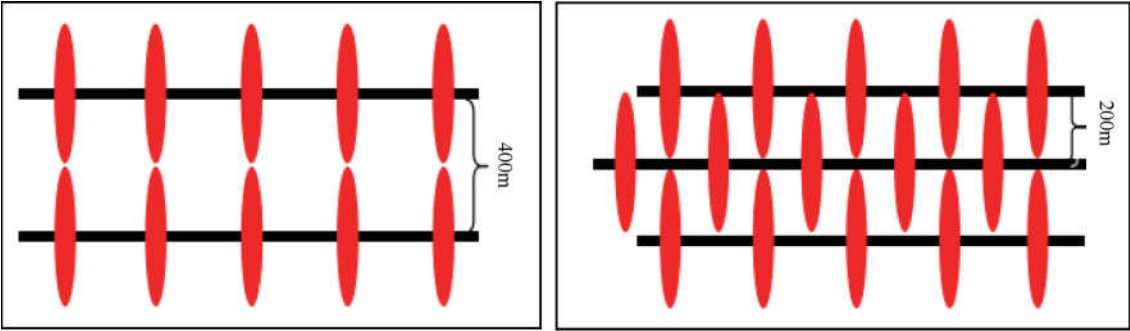


图 2 正对布缝与交错布缝示意图

Fig.2 Schematic diagram of the faced fracturing and the staggered fracturing

2.4 缩短簇间距,增加分簇数

水平井多段分簇射孔技术是致密油体积改造的关键技术之一。在前期常规体积压裂中一般采取每段分 2~4 簇,簇间距 20~30 m 的做法。根据“缝控”改造的核心理念,要实现人工裂缝对整个油藏储量的有效控制和动用,需要进行“密切割”,产生更多的人工裂缝来控制整个储集层地质储量。因此在不明显增加改造成本的情况下,增加分簇数成了较为理想的选择。根据区块数模优化结果,将簇间距缩短至 10~12 m,每段分簇数提高至 5~6 簇。

2.5 提高排量

大排量施工是实现体积改造的关键因素之一,在前期每段分 2~4 簇射孔时,12 m³/min 的排量满

足了体积改造的要求,但随着分簇数的增加,为了产生更多的横向分支裂缝,则需通过进一步提高施工排量,增加缝内净压力来实现。

2.6 提高细粉砂比例

提高细粉砂的使用比例是为了便于支撑剂的携带,实现对裂缝远端的有效支撑,提高储层有效改造体积,通过对区块前期压裂效果分析表明累计产油量与细砂用量存在正相关性,因此提高细粉砂的比例有利于单井产量的进一步提高。

通过“缝控”体积压裂技术攻关研究,马 56 区块整体工艺参数得到明显提高,水平井排距由最初 400 m 缩短至 50~200 m,而水平段长段则由 500~800 m 增加至 1 000~1 500 m,每段压裂段长由 80~120 m 缩短至 60~80 m,具体参数见表 1。

表 1 马 56 区块致密油“缝控”体积压裂关键技术变化参数表
Table 1 Key technical parameters of the “fracture-controlled” volume fracturing and well pattern for the tight oil in Block Ma56

项目	体积压裂	“缝控”体积压裂
排距/m	400	50~200
水平段长/m	500~800	1 000~1 500
段长/m	80~120	60~80
每段簇数	2~4	5~6
簇间距/m	20~30	10~12
压裂段数	6~10	>12
施工排量/(m ³ ·min ⁻¹)	10~12	14~15
支撑剂类型	70/140+40/70+30/50 目陶粒	70/140+40/70+30/50 目石英砂
液体体系	滑滴水+低浓度胍胶 压裂液	清水+低浓度滑滴水+ 超低浓度胍胶压裂液
滑滴水/清水比例 /%	50~60	>70

3 应用效果

截止目前共在马 56 区块实施“缝控”体积改造 41 井,单井水平段长 800~1 400 m,平均入井总液量 11 266.7 m³,入井总砂量 397.1 m³,压裂有效率

100%,压后初期平均单井日产液 35.3 m³,日产油 26.2 t。从图 3 可看出,采取“缝控”体积压裂后,平均单井初期日产油较初期基础井网下体积改造提高 36.7%~65.8%,应用效果突出。

以马 56-A 井为例,该井水平井长度为 1 356.0 m,采取细分切割体积改造的思路,共分 19 段分压(图 4),其中第五段和第八段因泵压达到施工限压而放弃施工。

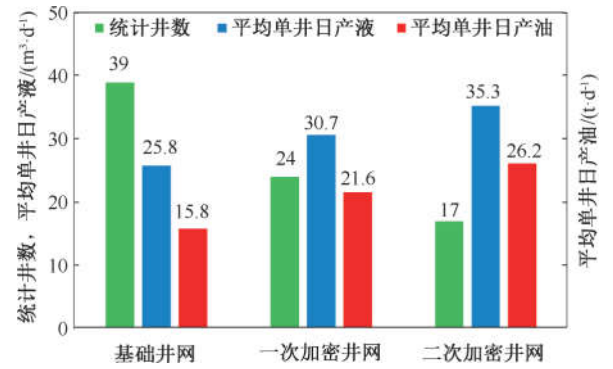


图 3 “缝控”体积压裂效果对比图

Fig.3 Effect comparison of “fracture controlled” volume fracturing

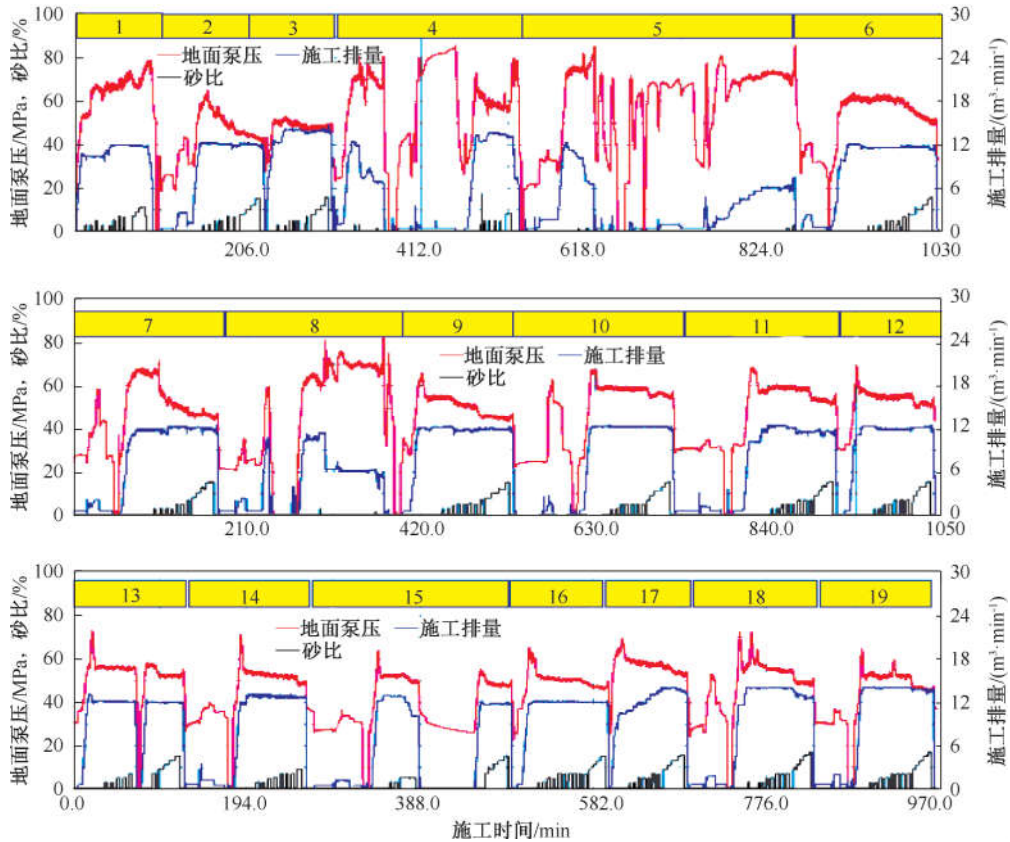


图 4 马 56-A 井压裂施工曲线图

Fig.4 Fracturing construction curve of well A in Block 56

该井累计入井总液量 22 586.9 m³,总砂量 712.4 m³,施工排量 10~14 m³/min,该井压后采用 2 mm 油嘴自喷生产,初期最高日产油达到 62.57 t。

通过“缝控”体积改造的实施,更加利于井间的压力传导,在该井压裂过程中周围邻井也获得压力响应,使得产量获得上升,实现了一井改造井组获得增产(表 2)。

表 2 马 56-A 井与邻井压力响应及压裂效果统计
Table 2 Statistics on pressure response and fracturing effect of well A and adjacent wells in Block 56

井号	对应井段	距离/m	响应情况	压前		压后		累增油/t
				日产液 /(m ³ ·d ⁻¹)	日产油 /(t·d ⁻¹)	日产液 /(m ³ ·d ⁻¹)	日产油 /(t·d ⁻¹)	
马 56-A	/	/	/	/	/	84.50	62.57	13 788
马 56-B	17~19	110	压裂过程中焖井压力由 17.5 MPa 上升至 25 MPa。	3.11	2.37	12.00	9.10	293
马 56-C	1~3	55	功图变饱满,液量明显上升。	4.30	3.16	15.60	11.10	267
马 56-D	15~19	160	功图变饱满,液量明显上升。	8.40	6.30	14.25	9.19	356
马 56-E	11	160	井口有溢流,挂抽后功图明显变饱满,液量大幅上升。	1.69	1.23	15.00	10.60	552

由表 2 可以看出,马 56-A 井压裂带动周围 4 口邻井合计日增液 39.35 m³,日增油 23.93 t,累计增油达到 1 468 t。截止 2018 年 5 月,马 56-A 井累计产油 13 788 t,按照目前 \$ 60/bbl 的油价计算,该井投入产出比已经超过 1:1.2,实现了效益开发。

4 结论

(1)吐哈盆地马 56 区块致密油资源潜力大,通过实施“缝控”体积压裂改造不仅可以明显提高区块储层可动用储量以及单井压裂改造效果,而且也有利于相邻井的地层压力的保持,增加相邻井产量。

(2)以地质研究为基础,采取地质工程一体化攻关和研究,提升钻完井品质,不断优化压裂工艺参数,可以实现致密油藏单井产量的进一步提高。

(3)随着区块致密油开发程度的不断深入,开发难度越来越大,水平井+体积压裂仍将是核心开发技术,建议继续加强致密油“缝控”体积压裂理论和现场攻关研究,为实现区块致密油的高效开发提供技术保障。

参考文献

[1] 杜金虎,何海清,杨涛,等.中国致密油勘探进展及面临的挑战[J].中国石油勘探,2014,19(1):1-9.
DU Jinhua, HE Haiqing, YANG Tao *et al.* Progress in China's tight oil exploration and challenges [J]. China Petroleum Exploration,2014,19(1):1-9.

[2] 向洪.三塘湖盆地马 56 区块致密油重复压裂实践[J].特种油气藏,2017,24(6):157-160.
XIANG Hong. Refracturing practice of tight oil reservoirs in Ma 56 block,the Santanghu basin [J]. Special Oil and Gas Reservoir,2017,24(6):157-160.

[3] 杜洪凌,许江文,李岫,等.新疆油田致密砂砾岩油藏效益开发的发展与深化——地质工程一体化在玛湖地区的实践与思考[J].中国石油勘探,2018,23(2):15-26.
DU Hongling, XU Jiangwen, LI Xun *et al.* Development and deepening of profitable development of tight glutenite oil reservoirs in Xinjiang oilfield: Application of geology-engineering integration in Mahu area and its enlightenment [J]. China Petroleum Exploration,2018,23(2):15-26.

[4] 张映红,路保平,陈作,等.中国陆相致密油开采技术发展策略思考[J].石油钻探技术,2015,43(1):1-6.
ZHANG Yinghong, LU Baoping, CHEN Zuo *et al.* Technical strategy thinking for developing continental tight oil in China [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015,43(1):1-6.

[5] 梁浩,李新宁,马强,等.三塘湖盆地条湖组致密油地质特征及勘探潜力[J].石油勘探与开发,2014,41(5):563-572.
LIANG Hao, LI Xinning, MA Qiang *et al.* Geological features and exploration potential of permian Tiaohu formation tight oil, Santanghu basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development,2014,41(5):563-572.

[6] 崔宝文,林铁峰,董万百,等.松辽盆地北部致密油水平井技术及勘探实践[J].大庆石油地质与开发,2014,33(5):16-22.
CUI Baowen, LIN Tiefeng, DONG Wanbai *et al.* Horizontal well techniques and their exploration practices in the tight oil reservoirs in north Songliao basin [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing,2014,33(5):16-22.

[7] 彭晖,刘玉章,冉启全,等.致密油储层水平井产能影响因素研究[J].天然气地球科学,2014,25(5):771-777.
PENG Hui, LIU Yuzhang, RAN Qiquan *et al.* Study on the horizontal well production in tight oil reservoirs [J]. Natural Gas Geoscience,2014,25(5):771-777.

[8] 李海涛,卢宇,谢斌,等.水平井多段分簇射孔优化设计[J].特种油气藏,2016,23(3):133-135.
LI Haitao, LU Yu, XIE Bin *et al.* Multi-stage clustering

- preformation optimization in horizontal well [J]. *Special Oil and Gas Reservoir*, 2016, 23(3): 133-135.
- [9] 陈铭, 胥云, 吴奇, 等. 水平井体积改造多裂缝扩展形态算法——不同布缝模式的研究[J]. *天然气工业*, 2016, 36(8): 79-87.
- CHEN Ming, XU Yun, WU Qi *et al.* Algorithm for multi-fracture propagation morphology in horizontal well volume fracturing: Investigation on different fracture distribution patterns [J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(8): 79-87.
- [10] 郭鹏, 姚磊华, 任德生, 等. 体积压裂裂缝分布扩展规律及压裂效果分析——以鄂尔多斯盆地苏53区块为例[J]. *科学技术与工程*, 2015, 15(24): 46-51.
- GUO Peng, YAO Leihua, REN Desheng *et al.* Fracture distribution and propagation laws and effect analysis of volume fracturing in the Su 53 Block, Ordos basin [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(24): 46-51.
- [11] 贾婷, 何强, 孙明, 等. 致密油区体积压裂效果分析[J]. *西安文理学院学报(自然科学版)*, 2017, 20(2): 113-116.
- JIA Ting, HE Qiang, SUN Ming *et al.* Analysis of volume fracturing effect in dense oil region [J]. *Journal of Xi'an University (Natural Science Edition)*, 2017, 20(2): 113-116.
- [12] 曲占庆, 黄德胜, 毛登周, 等. 基于灰色关联法的低渗气藏压裂效果影响因素分析[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(4): 603-609.
- QU Zhanqing, HUANG Desheng, MAO Dengzhou *et al.* The influencing factors of fracturing effects in low permeability gas reservoir with gray correlation method [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2014, 44(4): 603-609.
- [13] TANMAY M SONI. LPG-Based fracturing: An alternate fracturing technique in shale reservoirs [C]. SPE 170542, 2014.
- [14] 杨凯. 裂缝性低渗透油藏注水吞吐开发影响因素分析[J]. *特种油气藏*, 2010, 17(2): 82-84.
- YANG Kai. Influencing factors of water flooding development for fractured low-permeability reservoir [J]. *Special Oil and Gas Reservoir*, 2010, 17(2): 82-84.
- [15] 吴双, 刘平礼, 罗志峰, 等. 致密油储层改造的难点及工艺技术措施[J]. *重庆科技学院学报*, 2014, 16(6): 85-87.
- WU Shuang, LIU Pingli, LUO Zhifeng *et al.* Difficulties and technical measures of fracturing reconstruction in tight oil reservoirs [J]. *Journal of Chongqing Science and Technology College (Natural Science Edition)*, 2014, 16(6): 85-87.
- [16] 郑立军, 才博, 冉风华, 等. 致密油储层改造技术研究与应用[J]. *油气井测试*, 2015, 24(1): 4-7.
- ZHENG Lijun, CAI Bo, RAN Fenghua *et al.* Research on transformation technology of tight oil reservoir and its application [J]. *Well Testing*, 2015, 24(1): 4-7.
- [17] RICKMAN R, MULLEN M, PETRE E *et al.* A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: all shale plays are not clones of the Barnett shale [C]. SPE 115258, 2008.
- [18] KING G E. Thirty years gas shale fracturing: What have we learned [C]. SPE 133456, 2010.
- [19] 李向平, 齐银, 李转红, 等. 鄂尔多斯盆地安83区块致密油藏老井暂堵混合水体积压裂技术[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(6): 120-126.
- LI Xiangping, QI Yin, LI Zhuanhong *et al.* Temporary plugging and mixed water volume fracturing technology of tight oil reservoirs in An83 block, Ordos basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(6): 120-126.
- [20] 金成志, 杨东, 张永平, 等. 松辽盆地北部非均质致密油水平井增产改造设计优化技术[J]. *中国石油勘探*, 2014, 19(6): 40-46.
- JIN Chengzhi, YANG Dong, ZHANG Yongping *et al.* Optimization techniques for stimulation design of horizontal wells of heterogeneous tight oil in northern Songliao basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(6): 40-46.
- [21] 曲占庆, 曲冠政, 何利敏, 等. 压裂水平井裂缝分布对产能影响的电模实验[J]. *天然气工业*, 2013, 33(10): 52-57.
- QU Zhanqing, QU Guanzheng, HE Limin *et al.* The impact of fracture distribution on the productivity of a fractured horizontal well: A study based on electrolytic analogy experiments [J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(10): 52-57.
- [22] 陈作, 薛承瑾, 蒋廷学, 等. 页岩气井体积压裂技术在我国的应用建议[J]. *天然气工业*, 2010, 30(10): 30-32.
- CHEN Zuo, XUE Chengjin, JIANG Tingxue *et al.* Proposals for the application of fracturing by stimulated reservoir volume (SRV) in shale gas wells in China [J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(10): 30-32.

编辑 刘振庆

第一作者简介: 向洪, 男, 1984年9月出生, 工程师, 2017年毕业于东北石油大学石油与天然气工程专业, 现从事压裂技术研究与现场实施工作。电话: 0995-8371204, 13179955544; Email: xianghong1@petrochina.com.cn。通信地址: 新疆鄯善火车站镇吐哈油田公司工程技术研究院压裂酸化研究所, 邮政编码: 838202。